

# Cuantificación del flujo subterráneo en la vertiente suroccidental del Macizo del Moncayo, España

*Groundwater flow modeling of aquifers in the SW slope of the Moncayo Massif, Spain*

Alejandro García Gil<sup>1,2</sup>, José Ángel Sánchez Navarro<sup>1</sup>, Antonio Pérez García<sup>1</sup>, Enric Vazquez-Suñé<sup>2</sup> y Jesús Mateo Lázaro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009-Zaragoza, España.

agargil@unizar.es, joseange@unizar.es, anperez@unizar.es, jesumateo@eid.es

<sup>2</sup> GHS, Grupo de Hidrogeología Subterránea (IDAEA), CSIC, C/ Jordi Girona, 18-26, 08034-Barcelona, España. enric.vazquez@idaea.csic.es

## ABSTRACT

The objectives of this work are to update the hydrogeology of the carbonate aquifers from Ágreda (Soria), and to establish a conceptual model of the relationship of these aquifers with the Moncayo Massif. The feasibility of the conceptual model has been tested with a numerical model. Firstly, the parameters of the model have been calibrated (inverse method) with the head measurements. Then, the predictions have been validated with the discharge of the main springs. The numerical model has confirmed that the origin of Vozmediano spring is the Moncayo Massif. Conversely, the Ágreda and Añavieja springs recharge in their own hydrological basins. Once validated, several paleohydrological scenarios have been simulated. The results justify the importance of the tuffs barriers associated to the Ágreda and Añavieja discharges.

**Key-words:** Iberian Chain, Moncayo Massif, hydrogeology, groundwater flow modeling.

Geogaceta, 54 (2013), 107-110.  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

## Introducción

El Macizo del Moncayo es una zona topográficamente elevada y de fuerte precipitación que en relación al flujo del agua actúa como un "water tower"; de hecho es el origen de cuatro ríos: Huecha, Queiles, Isuela y Araviana. Es también la principal zona de recarga de acuíferos carbonatados, que en su vertiente Norte y Este constituyen una importante aportación al drenaje subterráneo de la cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro (San Román, 1994; Sánchez-Navarro, 1990). Por el contrario, en la vertiente suroccidental no existe un modelo conceptual global sobre como es el flujo subterráneo de este Macizo.

La zona de estudio (Fig. 1) corresponde a la Sierra del Moncayo y áreas adyacentes

hacia el Sur y Oeste de la misma. Los ríos Araviana, Queiles, Añamaza y Val configuran la red hidrográfica. La zona tiene una superficie de 390 km<sup>2</sup> de los que 314 pertenecen a la cuenca del río Ebro y el resto a la del Duero (río Araviana).

La geología de la zona corresponde a un zócalo hercínico, un tegumento pérmico-triásico (Buntsandstein principalmente), y unas formaciones de cobertera constituidas por materiales del Jurásico marino y materiales en "facies Purbeck-Weald" del Cretácico. Con un alineamiento estructural NO-SE la unidad geológica de la Sierra del Moncayo incluye el propio anticlinal del Moncayo que afecta a materiales principalmente permotriásicos y al conjunto de materiales jurásicos que lo rodean. El zócalo paleozoico aflora de forma importante al Sur en

## RESUMEN

Se ha realizado una actualización hidrogeológica de los acuíferos carbonatados de las Tierras de Ágreda (Soria) y del Macizo del Moncayo, y aplicado un modelo matemático de flujo subterráneo (código TRANSIN) que ha permitido identificar los sistemas de flujo, evaluar los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos (método inverso) y establecer un balance hídrico consistente entre las recargas y descargas medidas en los principales manantiales. El modelo matemático de flujo ha permitido confirmar que el flujo subterráneo del Moncayo en su vertiente Sur se dirige principalmente hacia el manantial de Vozmediano. Las otras dos zonas de descarga (Ágreda y Añavieja) reciben flujos que tiene su origen principal dentro de las cuencas hidrográficas de los ríos donde se encuentran. Con el modelo matemático de flujo se han simulado distintas condiciones iniciales (paleohidrogeología) que pudieran justificar el importante desarrollo y ubicación de los depósitos tobáceos ligados a las zonas de descarga de Ágreda y Añavieja.

**Palabras clave:** Sistema Ibérico, Macizo del Moncayo, hidrogeología, modelo numérico.

Fecha de recepción: 31 de enero de 2013  
Fecha de revisión: 25 de abril de 2013  
Fecha de aceptación: 24 de mayo de 2013

el bloque levantado de la Falla del Tablado, a lo largo del eje estructural Tablado-Torzano (Richter, 1930) de orientación NNO-SSE.

Los antecedentes hidrogeológicos de la zona se refieren principalmente a la zona de la laguna de Añavieja (Saavedra, 1853; SGOP, 1990; Sanz, 1992), y al manantial de Vozmediano (Sanz-Pérez, 1987). Los primeros mapas de isopiezas de carácter regional se deben a Coloma (1999) en su Tesis Doctoral.

El objetivo de este trabajo es establecer un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico que permita determinar la relación entre las principales zonas de descarga y el Macizo del Moncayo, integrarlo mediante un modelo numérico de flujo y evaluar cuantitativamente

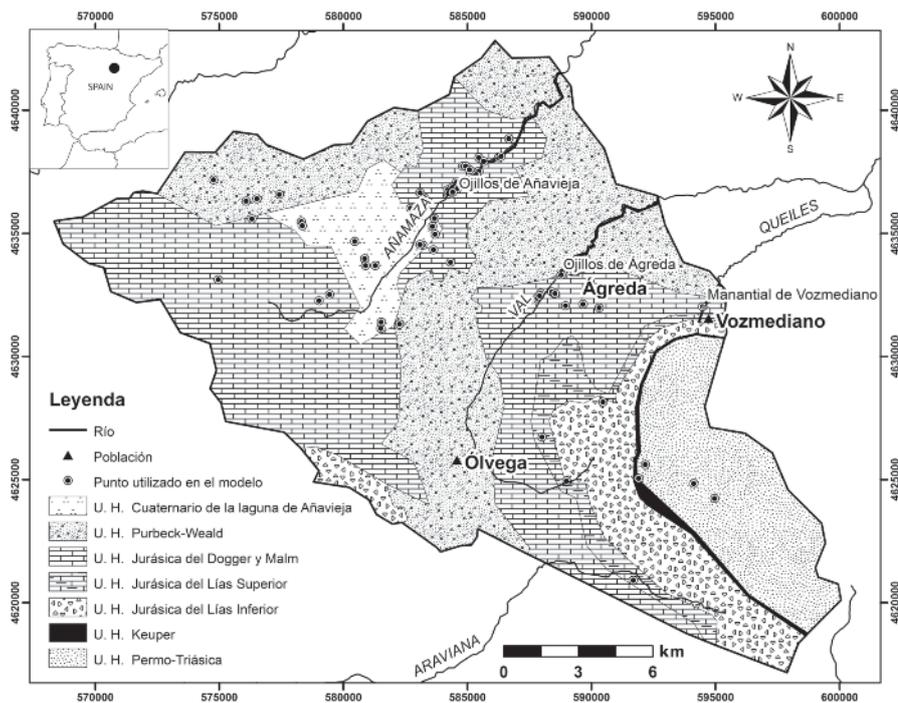


Fig. 1.- Localización geográfica de las zonas de estudio, zonificación del modelo y puntos de observación utilizados.

Fig. 1.- Geographic setting of the study area, model zonification and head data points.

el flujo del agua subterránea existente. Se pretende también evaluar la relación del drenaje subterráneo del Moncayo con importantes depósitos de tobas que se encuentran a lo largo de los ríos Añaveja, y Del Val, previamente estudiados por Luzón et al. (2011).

### Caracterización hidrogeológica de los materiales

Las Unidades Hidroestratigráficas (U.H.) de la zona son las siguientes:

1. *U. H. Permo-Triásica*: En esta unidad se incluyen las areniscas, conglomerados, lutitas rojas y dolomías de edad Permo-Triásica y también el sustrato paleozoico. En general se trata de materiales tipo "Hard Rock" con permeabilidad por fisuración.

2. *U. H. Keuper*: Los materiales arcillosos-evaporíticos del Keuper presentan permeabilidades muy bajas y separan el núcleo del Macizo del Moncayo de los principales acuíferos carbonatados. En ocasiones las formaciones permo-triásicas se encuentran en contacto discordante con las formaciones jurásicas.

3. *U. H. Jurásica del Lías Inferior*: Esta unidad se compone de carnioles y calizas con porosidad eficaz y permeabilidad importante. Son materiales muy susceptibles a la karstificación y según la tipología bá-

sica de acuíferos carbonatados de Bayó et al. (1986) se trata de un acuífero kárstico de flujo difuso con valores de transmisividad de 100 a 3000 m<sup>2</sup>·día<sup>-1</sup> (Coloma, 1999). Esta unidad está relacionada con el Manantial de Vozmediano, con un caudal de 500 a 800 Ls<sup>-1</sup>.

4. *U. H. Jurásica del Lías Superior*: La unidad se compone de un tramo de alternancia de margas y calizas de naturaleza poco permeable (Coloma, 1999) con valores de transmisividad menores de 10 m<sup>2</sup>·día<sup>-1</sup> que separan hidráulicamente dos U.H. acuíferas.

5. *U. H. Jurásica del Dogger y Malm*: Materiales carbonatados que presentan una red de fisuración que da lugar a un sistema kárstico importante. La unidad presenta valores de transmisividad de 60 a 4300 m<sup>2</sup>·día<sup>-1</sup> (Coloma, 1999). Su drenaje da lugar a las zonas de descarga de los "Ojillos del Cailles" en Ágreda (150 Ls<sup>-1</sup>) y los manantiales de Añaveja (240 Ls<sup>-1</sup>).

6. *U. H. Purbeck-Weald*: Se compone de limolitas y areniscas con niveles carbonatados. En estudios precedentes ha sido considerado como acuitardo (Coloma, 1999).

7. *U. H. Cuaternario de la laguna de Añaveja*: Se trata de sedimentos lacustres finos (limos y arcillas) con intercalaciones de gravas. Asociados a estos materiales se encuentran barreras de tobas.

### Modelo numérico de flujo

Se ha realizado un modelo numérico de flujo en condiciones estacionarias; el código utilizado ha sido TRANSIN (Medina y Carrera, 2003) utilizando su interfaz gráfica Visual Transin (UPC, 2003). Para su aplicación se ha elaborado una malla de elementos finitos de 3221 nodos y 7103 elementos triangulares que se extiende por toda la superficie de la zona estudiada con un mayor refinamiento en las zonas de interés o las que muestran mayores gradientes hidráulicos. El modelo simula el nivel piezométrico para las unidades acuíferas carbonatadas y para el Macizo Permo-Triásico en una sola capa continua para toda la zona de estudio.

Como datos de entrada al modelo se han utilizado los niveles piezométricos de los puntos que aparecen en la figura 1, los valores proceden del inventario de puntos de agua de la Confederación Hidrográfica del Ebro disponibles en la red ([www.chebro.es](http://www.chebro.es)). El modelo se ha discretizado en cinco zonas de diferente transmisividad y siete con distinto valor inicial de recarga. Las zonas de transmisividad se corresponden con las U.H. citadas, excepto las unidades "Purbeck-Weald" y "Cuaternario de la laguna de Añaveja" ya que se considera que no intervienen en el flujo general de los acuíferos carbonatados; los valores de transmisividad corresponden a los establecidos por Coloma (1999). Las zonas de recarga son coincidentes con la superficie aflorante de cada U.H., los valores utilizados son los proporcionados por CHE que oscilan entre 30-100 mm según la precipitación y permeabilidad de los materiales. Otros datos a considerar son los caudales de las zonas de descarga y los caudales de base de los ríos. En la Tabla I aparecen los valores utilizados.

La calibración del modelo se realiza teniendo en cuenta tres aspectos: (1) el mejor ajuste posible entre los datos de niveles piezométricos calculados por el modelo y los observados, (2) coherencia con los valores de los parámetros hidráulicos y su rango de incertidumbre, y (3) coherencia con los balances de masa que se dispone de la zona de estudio.

### Resultados

En la figura 2 se muestra el ajuste obtenido con los niveles piezométricos. Como puede verse se obtiene un coeficiente de

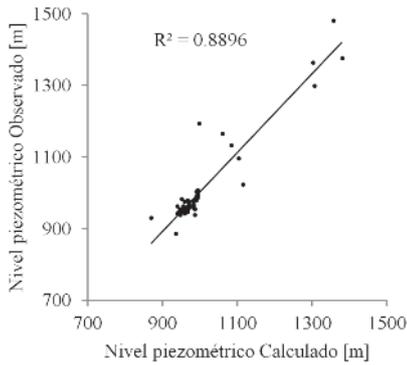


Fig. 2.- Nivel piezométrico observado y calculado.

Fig. 2.- Observed versus calculated head values.

correlación coherente con la información hídrica existente: las mayores desviaciones se producen en zonas próximas al Macizo del Moncayo donde están los mayores gradientes y hay menor densidad de medidas de nivel piezométrico.

En la calibración se han obtenido los valores de transmisividad de las distintas U.H. (Tabla I.C). Como puede verse son coherentes con el rango de valores previamente considerados. Destacar que la elevada transmisividad de la U.H. Jurásica del Dogger y Malm está justificada por su potencia (más de 400 m).

El programa realiza un balance de masa satisfactorio, con unos caudales base de las principales zonas de surgencia muy similares a los observados (Tabla I.B). En cuanto a los valores de recarga (Tabla I.A), se destacan diferencias relevantes con los datos de entrada generales, destacando el elevado valor de recarga de la U.H. Jurásica del Lías Inferior (6.8 hm<sup>3</sup>/año, equivalentes a 163 mm sobre la superficie de la unidad) ya que recibiría la escorrentía superficial de la vertiente Sur del Moncayo (cuenca del Arriana) al infiltrarse en los sumideros kársticos, ya citados en Sanz-Pérez (1987).

En la figura 3 se muestra el mapa de isopiezas de la zona. Como puede verse la práctica totalidad del flujo subterráneo de la vertiente sur del Moncayo, se dirige a través de la U. H. Jurásica del Lías Inferior hacia una única zona de descarga que es el manantial de Vozmediano (cota 920). Las otras dos zonas de descarga, quedan también patentes, mostrando como los manantiales de Añavieja drenan exclusivamente la cuenca hidrográfica del río Añamaza, sin relación actual con el macizo del Moncayo.

A. ZONAS DE RECARGA	Recarga Modelo [mm/año]	Recarga Modelo [hm <sup>3</sup> /año]
U. H. Permo-Triásica	33	1.8
U. H. Jurásica del Lías Inferior	163	6.8
U. H. Jurásica del Lías Superior	66	0.97
U. H. Jurásica del Dogger y Malm	100	15
U. H. Purbeck-Weald	66	7.8
U. H. Cuaternario de la laguna de Añavieja	43	0.9
B. ZONAS DE SALIDA	Medidas Observadas [L/s]	Descargas Modelo [L/s]
Río Queiles (Manantial deVozmediano)	500-800*	-513
Zona de manantiales del río Añamaza	240**	-268
Zona de manantiales del río Val (Ágreda)	150**	-148
C. ZONAS DE TRANSMISIVIDAD	Transmisividad Obs. [m <sup>2</sup> /día]	Transmisividad Modelo [m <sup>2</sup> /día]
U. H. Jurásica del Lías Inferior	100-3000**	270
U. H. Jurásica del Lías Superior	< 10**	2.7
U. H. Jurásica del Dogger y Malm	60-4300**	710
U. H. Keuper	-	0.2
U. H. Permo-Triásica	-	2.3

\* Sanz (1987)      \*\* Coloma (1999)

Tabla I.- Balance de agua anual del modelo y transmisividades obtenidas en la calibración.

Table I.- Calculated water budget and transmissivities.

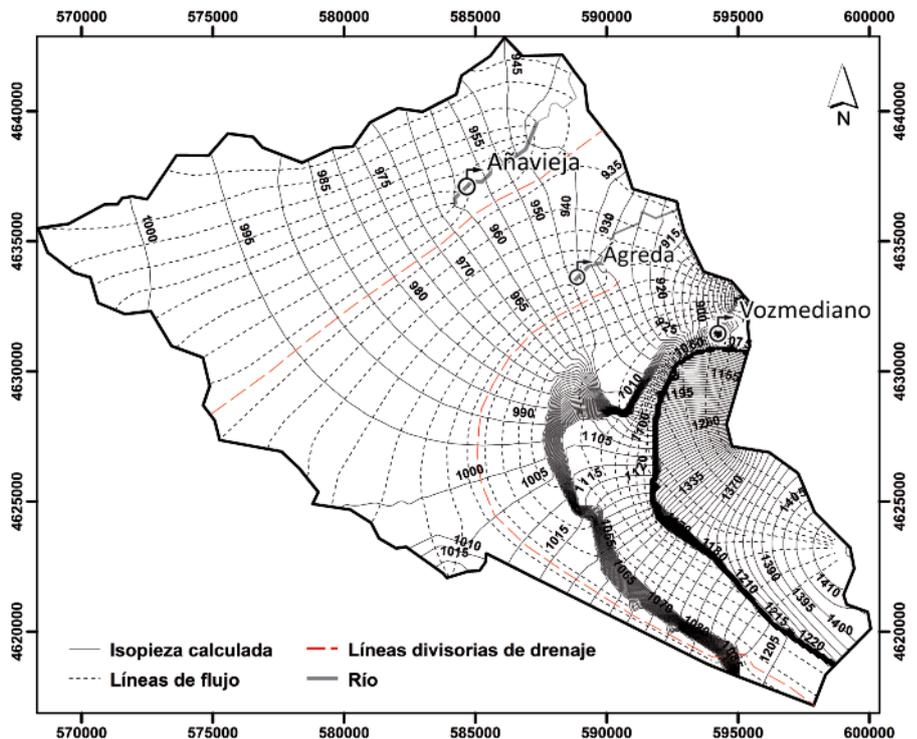


Fig. 3.-Modelo de drenaje del Macizo del Moncayo en su vertiente suroccidental; mapa de isopiezas calculado.

Fig. 3.- Potentiometric surface map and groundwater flow pattern of the aquifers from the SW Moncayo Massif.

El modelo de drenaje actual no justificaría la extensión y potencia que las barreras de tobas presentan en los ríos Añamaza y Del Val. Por otra parte se destaca que las aguas de los manantiales de Añavieja y Ágreda están en la actualidad sobresatura-

das en calcita, mientras que las del manantial de Vozmediano son subsaturadas, y no existen depósitos tobáceos, ni actuales, ni pasados. Con el modelo matemático se ha simulado un escenario en el que no existiera el drenaje a través del manantial de Voz-

mediano. Se trataría de una situación previa en la que la erosión remontante del río Queiles (Pellicer, 1984) no habría alcanzado las U.H. Jurásica del Lías Inferior. El resultado muestra la importancia que en esa situación adquirirían las zonas de descarga de Agreda y Añavieja (Fig. 4), multiplicando por tres los caudales y modificándose sustancialmente el modelo de flujo.

## Conclusiones

El modelo matemático de flujo realizado ha permitido establecer un esquema general de funcionamiento hidrogeológico de la zona. La calibración y validación del modelo con las medidas de nivel piezométrico observadas, la recarga propuesta y los caudales de base de manantiales y ríos han sido satisfactorias, coherentes con las medidas realizadas en campo y los datos bibliográficos.

Los resultados del modelo numérico muestran cómo el flujo se compartimenta del siguiente modo: El flujo superficial y subterráneo del Macizo del Moncayo se dirige principalmente hacia el manantial de Vozmediano a través de la U. H. Jurásica del Lías Inferior favorecido por la presencia de la U. H. Jurásica del Lías Superior que actúa de barrera hidráulica de baja permeabilidad. Este flujo se produce bajo un elevado gradiente hidráulico favoreciendo procesos de karstificación.

Los manantiales de Ágreda drenan preferentemente materiales de la U. H. Jurásica del Dogger y Malm, situada inmediatamente al oeste del Macizo del Moncayo, mientras que los manantiales de Añavieja proceden del mismo acuífero, pero su zona actual de recarga es la cuenca del río Añamaza.

Una vez calibrado el modelo se han simulado diferentes escenarios de drenaje del Macizo del Moncayo capaces de explicar registros sedimentarios con significado paleohidrogeológico, como son los sedimentos lacustres y las barreras de tobas observadas.

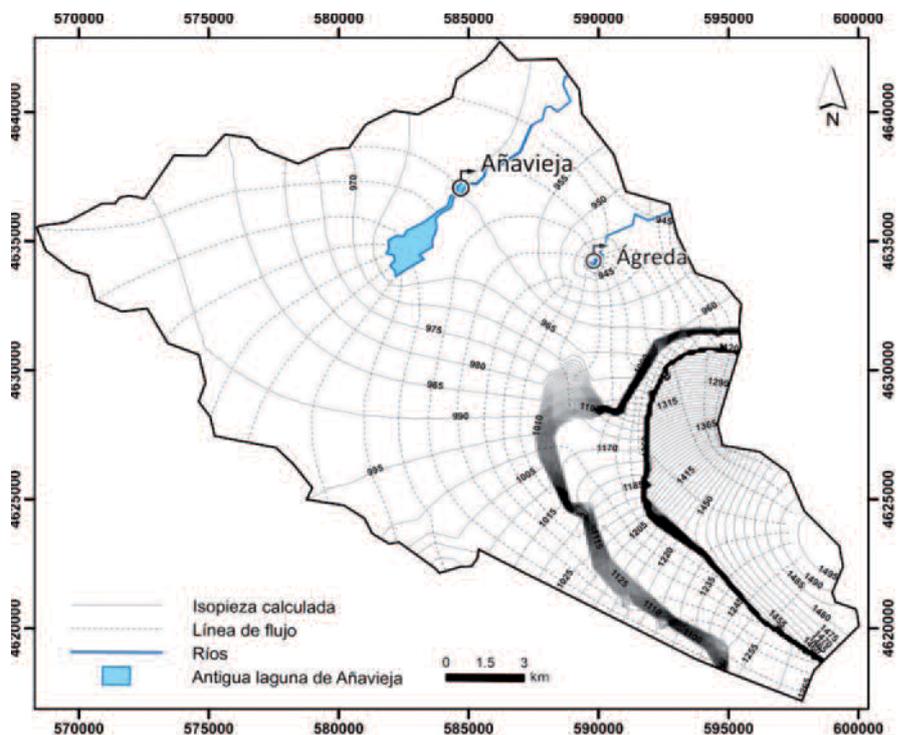


Fig. 4.- Mapa de isopiezas calculado sin el manantial de Vozmediano.

Fig. 4.- Potentiometric surface map and groundwater flow pattern excluding Vozmediano spring.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado, en parte, por el proyecto de MICINN: CGL2009-09165BTE, FEDER, Fondo Social Europeo y Grupo de Análisis de Cuenas Sedimentarias Continentales del Gobierno de Aragón.

## Referencias

- Bayo, A., Castiella, J., Custodio, E., Niñerola, S. y Virgós, L. (1986). En: *Jornadas sobre el karst*. Euskadi-86. Comunicaciones, 2, 255-340.
- Coloma, P. (1999). *Funcionamiento hidrogeológico de las cuencas riojanas orientales: Iregua, Leza, Cidacos y Alhama (Cuenca del Ebro)*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 506 p.
- Luzón, A., Pérez, A., Borrego, A.G., Mayayo, M.J. y Soria A.R. (2011). *Sedimentary Geology* 239, 87-103.
- Medina, A. y Carrera, J. (2003). *Journal of Hydrology* 281, 251-264.

- Pellicer, F. (1984). *Geomorfología de las Cadenas Ibéricas entre el Jalón y el Moncayo*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 389 p.
- Richter, G. (1930). En: *Sobre Geología de España*. Comunicaciones 9, 62-142.
- Saavedra, E. (1853). En: *Dirección General de Obras Hidráulicas*. Comunicaciones.
- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) (2003). *Código Visual Transin*. Barcelona.
- San Román, F.J. (1994). *Estudio hidrogeológico del interfluvio Queiles-Jalón (Zaragoza)*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 265 p.
- Sánchez-Navarro, J.A., San Román, J., De Miguel, J.L. y Martínez-Gil, F.J. (1990). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 8, 115-118.
- Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) (1990). *Estudio Hidrogeológico de Soria*.
- Sáenz-Pérez, E. (1987). *El Karst del Sur y Oeste del Moncayo*. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior Ingenieros de Caminos, Madrid, 164 p.
- Sáenz-Pérez, E. (1992). En: *V Simposio Nacional de Hidrogeología*. Comunicaciones, 15, 83-96.